DOI:10.11931/guihaia.gxzw202407043

# 西南地区植被生态系统 GPP 时空变化及其主导气候因子识别

谢宗音， 黎珍惜*

（广西壮族自治区自然资源遥感院，南宁 530000）

**摘　要：**探究西南地区植被生态系统（农田、林地和草地）GPP 时空变化以及气候因子对其变化的影响，对全球气候变化背景下植被资源分类管理具有重要的意义。该研究基于 2000—2022 年植被 GPP、气温和降水数据，以及 2020 年土地利用类型数据，基于 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验，解析西南地区植被生态系统 GPP 时间变化特征和空间变迁格局；通过通径分析，揭示气温和降水对植被 GPP 的直接、间接和综合影响及其主导影响因子。结果表明：（1）2000—2022 年西南地区各植被生态系统 GPP 呈显著上升趋势（$P$<0.05），其中，农田生态系统 GPP 上升速率最高，草地生态系统 GPP 上升速率最低。（2）区域尺度上，西南地区气温对植被 GPP 的直接、间接和综合影响均为正向作用，而降水对植被 GPP 的影响均为负向作用。气温对草地生态系统 GPP 变化的直接影响最大，降水对农田生态系统 GPP 变化的直接影响最大。（3）像元尺度上，气温对西南地区和各生态系统 GPP 变化的影响强于降水。气温直接影响主导 54.89%植被 GPP 变化。综上可知，西南地区植被生态系统植被GPP呈正向变化的面积占比较大，气温的直接影响是主导各植被生态系统GPP 变化的主要方式。该研究结果能够为在全球气候变化情境下，制定具有区域针对性的生态恢复与管理政策提供有价值的参考依据。

**关键词：**西南地区，植被生态系统，GPP，气候因子，通径分析

# Temporal and spatial variations of gross primary productivity (GPP) in vegetation ecosystems and its dominant climatic factors identification in Southwest China

XIE Zongyin, LI Zhenxi*

（ *Guangxi Zhuang Autonomous Region Institute of Natural Resources Remote Sensing*, Nanning 530000, China）

**Abstract:** Exploring the spatiotemporal variations of Gross Primary Productivity (GPP) across vegetation ecosystems (cropland, forest, and grassland) in Southwest China, as well as the direct, indirect, and comprehensive impacts of climatic factors on these variations, holds significant importance for managing regional vegetation resources amidst climate change. Based on GPP, temperature, and precipitation data spanning from 2000 to 2022, coupled with land use type data from 2020, this study adopts methods such as Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test, and path analysis to investigate the spatiotemporal patterns of GPP within Southwest China's vegetation ecosystems. It further dissects the direct, indirect, and overall effects of temperature and precipitation on vegetation GPP, revealing the dominant climatic factors and

---

**基金项目**：广西重点研发计划项目（编号：桂科 AB22080080）； 高分辨率对地观测系统重大专项政府综合治理应用于规模化产业化示范项目（编号：84-Y50G25-9001-22/23）。

**第一作者**：谢宗音(1986—)，学士，高级工程师，主要从事摄影测量与遥感方面的研究，（Email）247807325@qq.com。

***通信作者**：黎珍惜，高级工程师，主要从事地理信息与遥感应用研究，（Email）ygysy_2024@163.com。

their modes of influence on GPP changes in the region. The findings are as follows: (1) From 2000 to 2022, a significant upward trend (*P*<0.05) was observed in GPP across all vegetation ecosystems in Southwest China, with the cropland ecosystem experiencing the highest increase rate, and the grassland ecosystem, the lowest. (2) At the regional scale, temperature had a positive direct, indirect, and overall effect on vegetation GPP, whereas precipitation exerted a negative influence. Temperature had the most significant direct impact on grassland ecosystem GPP, while precipitation's direct impact was greatest on cropland ecosystem GPP. (3) At the pixel scale, temperature's influence on GPP changes in Southwest China and its individual ecosystems was stronger than that of precipitation. Temperature directly dominated 54.89% of the changes in vegetation GPP. In summary, a considerable proportion of vegetation ecosystems in Southwest China showed positive changes in GPP, with temperature's direct effect being the primary driver of GPP variations across these ecosystems. These findings provide valuable insights for formulating regionally adaptive ecological restoration and management policies amidst global climate change.

**Keywords:** Southwest China, vegetation ecosystem, gross primary productivity (GPP), climatic factors, path analysis

植被是生态系统中能量流动与物质循环的关键桥梁（Ritter et al.，2020；Higgins et al.，2023）。植被的总初级生产力（GPP）是指在特定时间单位与面积单位内，生态系统中绿色植物经由光合作用过程所累积的有机碳总量。（Ritter et al.，2020；Camps-Valls et al.，2021），植被 GPP 不仅反映生态系统的生产能力和健康状态，还是衡量碳循环效率与可持续发展水平的关键指标（Xu et al.，2019；Knauer et al.，2023； Zhong et al.，2023）。植被 GPP 与气候之间存在着密切的关系，气候因素直接影响植被 GPP 的变化，而植被 GPP 的变化又会对气候产生反馈作用（Ji et al.，2024；罗敏等, 2024；徐勇等，2024）。因此，研究植被 GPP 长期变化特征，并分析其与气候因子间的关系对于气候变化背景下植被固碳潜力评估具有重要的意义。

已有研究在国家和区域尺度上探究了植被 GPP 与气候因子间的关系。Ji 等（2024）研究表明，1982-2018 年全球超过 60%的林地 GPP 呈显著上升趋势，而林地 GPP 变化受 $CO_2$ 施肥的影响强于气温、降水和太阳辐射等气候因子，并且太阳辐射对 GPP 的负向影响正在增强。Fan 等（2023）研究发现，2001—2018 年东南亚和云南植被 GPP 上升速率大于植被 EVI，并且在大部分区域气温和降水对植被 EVI 的影响大于植被 GPP，38~40%研究区域的植被变化主要受气候变化的主导。Yuan 等（2020）分析了 1901—2016 年和 2006—2100 年植被 GPP 对极端气温和降水的响应，发现植被 GPP 对北纬高纬度地区和高海拔地区（如青藏高原）的极端气温以及热带地区的极端降水最为敏感。高振翔等（2022）研究表明 1982—2016 年中国植被 GPP 整体呈上升趋势，植被 GPP 与气温和降水均呈正相关，并且植被 GPP 与气温的相关系数高于降水。杨宇萌等（2024）研究表明气温、降水和土壤湿度与植被 GPP 均有较好的相关性，降水对植被 GPP 的影响更为显著，气候变化对多个时间段内的植被恢复其决定性作用，而人类活动对植被退化的影响高于气候变化。徐勇等（2023a）研究表明，湿度、日照时数和降水是影响中国植被 GPP 空间分异的主要影响因子。西南地区植被 GPP 空间分异主要受降水和其他因子的协同影响。以上研究表明，植被 GPP 与气温和降水的相关性存在明显地域分异性，并且已有研究表明不同植被生态系统对气温和降水的响应程度存在差异（Dang et al.，2023；Xu et al.，2024；戴黎聪等，2029；徐勇等 2023a）。已有研究大多采用相关分析和偏相关分析来判定植被指数与气候因子之间的关系（Gao et al.，2022；Ren et al.，2023；莫建飞，2024），忽视了气候因子之间复杂的相互作用。通径分析

（徐勇等，2024）是一种多元统计分析方法，能够揭示多个自变量与因变量之间的复杂关系，探究气候因子对植被 GPP 的直接、间接和综合影响。

西南地区地处中国西南部，地貌类型复杂，气候条件多变，植被资源丰富，明显的区域差异使得植被生态系统对气候变化的响应较为复杂。因此，本文以西南地区为研究区域，采用植被 GPP、气温和降水数据，通过 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验和通径分析等方法，拟探讨以下问题：（1）西南地区植被生态系统植被 GPP 时空变化特征；（2）气温和降水对西南地区植被生态系统直接、间接和综合影响的差异及其空间分布特征；（3）不同植被生态系统 GPP 变化的主导气候因素及其影响方式。

# 1 研究区概况

西南地区位于中国西南部，地理位置坐标范围在 97°21′E 至 112°04′E、20°54′N 至 34°19′N，涵盖了云南、贵州、四川、重庆以及广西等省份，其总面积达到了 137.63 万 $km^2$，约占中国陆地国土面积的 14.33%。研究区地势起伏较大，高程在－20～6 304 m。西南地区位于热带季风区和亚热带季风区，降水充沛，热量充足，雨热同期，年均降水在 115.99~2 543.75 mm，年均气温在－2.76~23.66 ℃，降水和气温在空间上呈从东南到西北逐渐递减的趋势。西南地区农田、林地和草地分别占西南地区总面积的 24.06%、48.76%和 23.08%（图 1）。西南地区为典型的喀斯特地貌区，其特殊的地理位置、复杂的气候条件和地貌条件使得该地区植被资源十分丰富，其中，云南省高等植物约 17 000 种，占全国的 57%，四川省的四川省有维管束植物 9 254 种，其中乔木约 1 000 多种，占全国总数的一半。具体而言，草原、草甸和高山植被主要分布在高海拔的高原和山地地区，灌丛、针叶林、阔叶林和沼泽主要分布在中海拔山地和丘陵地区，而草丛和栽培植被主要分布在低海拔的丘陵和平原地区。多样的植被类型和脆弱的生态环境，成为了我国生态环境保护工作中不可忽视且至关重要的重点区域。

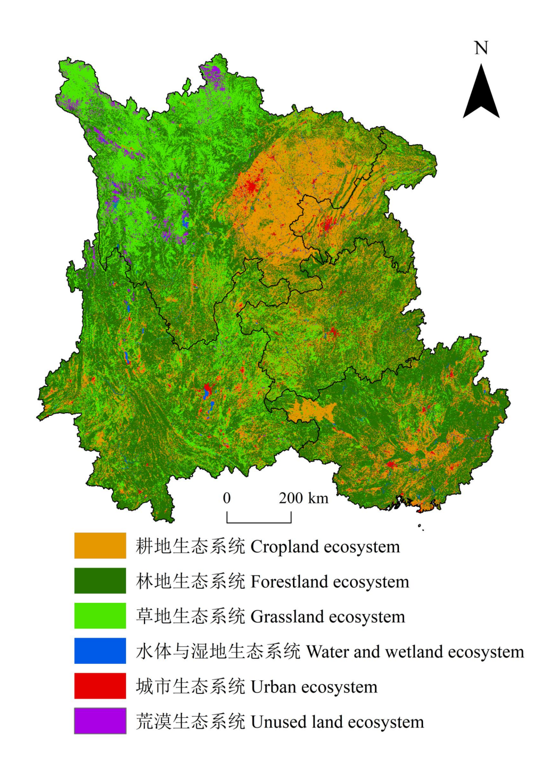



**图 1 西南地区生态系统空间分布**

Fig. 1 Spatial distribution of ecosystems in Southwest China

# 2 材料与方法

## 2.1.数据来源

本文使用的 GPP 数据由 LAADS DAAC（ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov）提供，数据为开源数据，数据集名称为 MOD17A2H，数据每 8 天一期，空间分辨率为 500 m。为确保生成的 MODIS GPP 时间序列数据集的准确性和可用性，基于 GEE 平台，合成并裁剪得到 2000—2022 年西南地区 MODIS GPP 时间序列数据，空间分辨率重采样为 1 km。

气温和降水数据来源于资源与环境科学数据平台（https://www.resdc.cn/）提供的中国气象要素月度空间插值数据集，数据空间分辨率为 1 km，覆盖全国。本文经过裁剪得到西南地区 2000—2022 年的逐月气温和降水时间序列。

2020 年土地利用遥感监测数据集来源于资源与环境科学数据平台（https://www.resdc.cn/），空间分辨率为 1 km。土地利用类型可以分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地，分别占总面积的 24.06%、48.76%、23.08%、1.07%、1.625% 和 1.42%（2020 年）。本文定义耕地、林地和草地分别为农田、林地和草地生态系统。

## 2.2.研究方法

### 2.2.1.Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计方法，用于分析数据集中的趋势（Arrogante-Funes et al.，2024）。该方法具有抗噪性强和可以降低数据异常值的影响等优势，常用于气象、水文、植被指数等长时间序列数据的分析。

$$\text{Slope}_{GPP}=\text{median}\left(\frac{GPP_j-GPP_i}{j-i}\right),\ 2000\le i\le j\le 2022 \quad (1)$$

式中：$\text{Slope}_{GPP}$为植被 GPP 变化趋势；median 表示中值函数；$GPP_j$和$GPP_i$分别表示 $j$ 年和 $i$ 年的植被 GPP 值。

### 2.2.2.Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall 显著性检验是一种非参数统计检验方法（Wang et al.，2023），该方法具有无需样本数据服从正态分布、不受少数异常值的干扰和适用范围广等优点，常用于长时间序列数据变化趋势的显著性检验，其计算公式为：

设定$\{GPP_i, GPP_j\}$，$i$=2000，2001，⋯，2022

定义 Z 统计量为：$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & ,S>0\\ 0 & ,S=0\\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & ,S<0\end{cases} \quad (2)$$

其中，$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} sgn\left(GPP_j-GPP_i\right) \quad (3)$$

$$\text{sgn}\left(GPP_j-GPP_i\right)=\begin{cases}1, GPP_j-GPP_i>0\\ 0, GPP_j-GPP_i=0\\ -1, GPP_j-GPP_i<0\end{cases} \quad (4)$$

$$\text{VAR(S)}=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中：$GPP_i$和$GPP_j$分别表示每个像元第 $i$ 年和第 $j$ 年的植被 GPP 值；$n$ 表示时间序列长度；$sgn$ 为符号函数；$VAR(S)$为方差；统计量 Z 的取值范围为（-∞，+∞）。当$|Z|>Z_{1-\alpha/2}$时，表明西南地区植被 GPP 在时间序列长度内发生了显著趋势变化，反之则为无显著趋势变化，将变化趋势划分为 3 个显著性等级：极显著变化（$P$＜0.01）、显著变化（0.01≤$P$＜0.05）、不显著变化（$P$≥0.05）。

### 2.2.3.通径分析

通径分析是一种综合了多元线性回归分析和相关分析的技术方法，可用于探究植被 GPP 与气候因子之间的线性关系。通过通径分析，将 GPP 与气候因子之间的相关系数（综合影

响）分解为气候因子对 GPP 的直接和间接影响（Feng et al.，2021；徐勇等，2024）。本研究利用通径分析探究气温和降水对植被 GPP 的影响，其原理如下：

因变量 $y$ 和自变量 $x_i$ 的回归方程为：

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_n x_n \tag{6}$$

式中：$a_n$ 为非标准化系数，对线性回归方程进行数学变换建立正规矩阵方程。

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1x_2} & \cdots & r_{x_1x_n} \\ r_{x_2x_1} & 1 & \cdots & r_{x_2x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_nx_1} & r_{x_nx_2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1y} \\ r_{x_2y} \\ \vdots \\ r_{x_ny} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：$r_{x_ix_j}$（$i, j \leqslant n$）表示 $x_i$ 和 $x_j$ 的相关系数，$r_{x_iy}$（$i \leqslant n$）表示 $x_i$ 和 $y$ 的相关系数。

通过矩阵方程的求解，我们可以得到直接通径系数 $a_i$，它代表了自变量 $x_i$ 对因变量 $y$ 的直接作用效果。而间接通径系数则由$r_{x_ix_j} \cdot a_i$ 得出，它表示 $x_i$ 通过另一个自变量 $x_j$ 对 $y$ 产生的间接影响。

为了统一不同变量之间的单位和量纲，我们采用了 Z-score 标准化方法（李双成和蔡运龙, 2005；徐勇等，2024）对 GPP、气温以及降水数据进行了处理。

$$X_{std} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \tag{8}$$

式中：$X_{std}$ 代表经过标准化处理后的数值，$\bar{x}$代表平均值，而$\sigma$则表示标准差。

根据植被的总初级生产力（$GPP_{\mathrm{stad}}$）、气温（$T_{\mathrm{stad}}$）以及降水（$P_{\mathrm{stad}}$）的数据，我们构建了多元线性回归方程：

$$GPP_{\mathrm{stad}} = A_t \times T_{\mathrm{stad}} + A_p \times P_{\mathrm{stad}} + \varepsilon \tag{9}$$

式中：$A_t$ 代表气温对植被 GPP 的直接通径系数，它反映气温对植被 GPP 的直接影响；$A_p$ 则代表降水对植被 GPP 的直接通径系数，体现降水对植被 GPP 的直接影响；而$\varepsilon$则代表残差项。

气温与降水之间存在着相互的影响作用，这种相互作用可以表达为：

$$A_{tp} = r_{tp} \times A_p \tag{10}$$

$$A_{pt} = r_{tp} \times A_t \tag{11}$$

式中：$A_{tp}$ 表示气温与植被 GPP 的间接通径系数，即气温对植被 GPP 的间接影响；$A_{pt}$ 表示降水与植被 GPP 的间接通径系数，即降水对植被 GPP 的间接影响；$r_{tp}$ 表示气温和降水之间的相关系数。

植被 GPP 与气候因子的直接通径系数和间接通径系数之和等于相关系数。

$$r_{t_gpp} = A_t + A_{tp} \tag{12}$$

$$r_{p_gpp} = A_p + A_{pt} \tag{13}$$

式中：$r_{t_gpp}$ 为气温与植被 GPP 的相关系数，即气温对植被 GPP 的综合影响，$r_{p_gpp}$ 为降水与植被 GPP 的相关系数，即降水对植被 GPP 的综合影响。当植被 GPP 与气温和降水的直接相关系数、间接相关系数和综合相关系数通过 $P$＜0.05 显著性检验时，即二者之间呈显著影响，否则为不显著影响。

本文使用最大值法在像元尺度上识别主导植被 GPP 变化的气候因子。

$$\mathrm{Cli}_{\mathrm{Dominant}} = \mathrm{Max}\{\mathrm{abs}(A_t), \mathrm{abs}(A_{tp}), \mathrm{abs}(A_p), \mathrm{abs}(A_{pt})\} \tag{14}$$

式中：$\mathrm{Cli}_{\mathrm{Dominant}}$ 表示影响植被 GPP 变化的主导气候因子，Max{}为取最大值函数，abs( )为取绝对值函数。

# 3 结果与分析

## 3.1.植被 GPP 和气候因子时空变化特征

由图 2：a 可知，西南地区植被 GPP 多年平均值为 632.88 $g \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$。研究时段内，西南

地区植被 GPP 呈显著上升趋势（$P$<0.05），上升速率为 3.49 g·(m$^2$·a)$^{-1}$。由图 2：b-d 可知，2000—2022 年西南地区农田、林地和草地生态系统 GPP 呈显著上升，速率分别为 3.72、3.54 和 3.53 g·(m$^2$·a)$^{-1}$。林地生态系统 GPP 多年平均值最高，为 684.32 g·(m$^2$·a)$^{-1}$，农田生态系统 GPP 多年平均值次之，为 613.83 g·(m$^2$·a)$^{-1}$，草地生态系统 GPP 多年平均值最低为 571.14 g·(m$^2$·a)$^{-1}$。

由图 3:a 可知，2000—2022 年西南地区植被 GPP 平均值在 18.09~1070.83 g·(m$^2$·a)$^{-1}$。植被 GPP 高值区主要分布在研究区南部，而低值区主要分布在若尔盖高原、四川盆地和广西东南部。由图 3:b 可知，研究时段内西南地区植被 GPP 变化斜率在－35.31~54.42 g·(m$^2$·a)$^{-1}$。由图 3:c 可知，研究区 86.01%的植被 GPP 呈上升趋势，通过 $P$<0.05 显著性检验的区域占 37.35%，主要分布在四川盆地四周，云南、贵州和四川三省交界处，云南西部和广西中部。从不同的植被生态系统上看，农田、林地和草地生态系统 GPP 呈上升趋势的面积占比分别为 84.37%、88.35%和 87.19%，其中，通过 $P$<0.05 显著性检验的区域分别占 44.57%、37.35%和 33.07%。综上表明，林地生态系统 GPP 呈正向变化的区域占比最大，但农田生态系统 GPP 呈显著上升的面积占比最大。

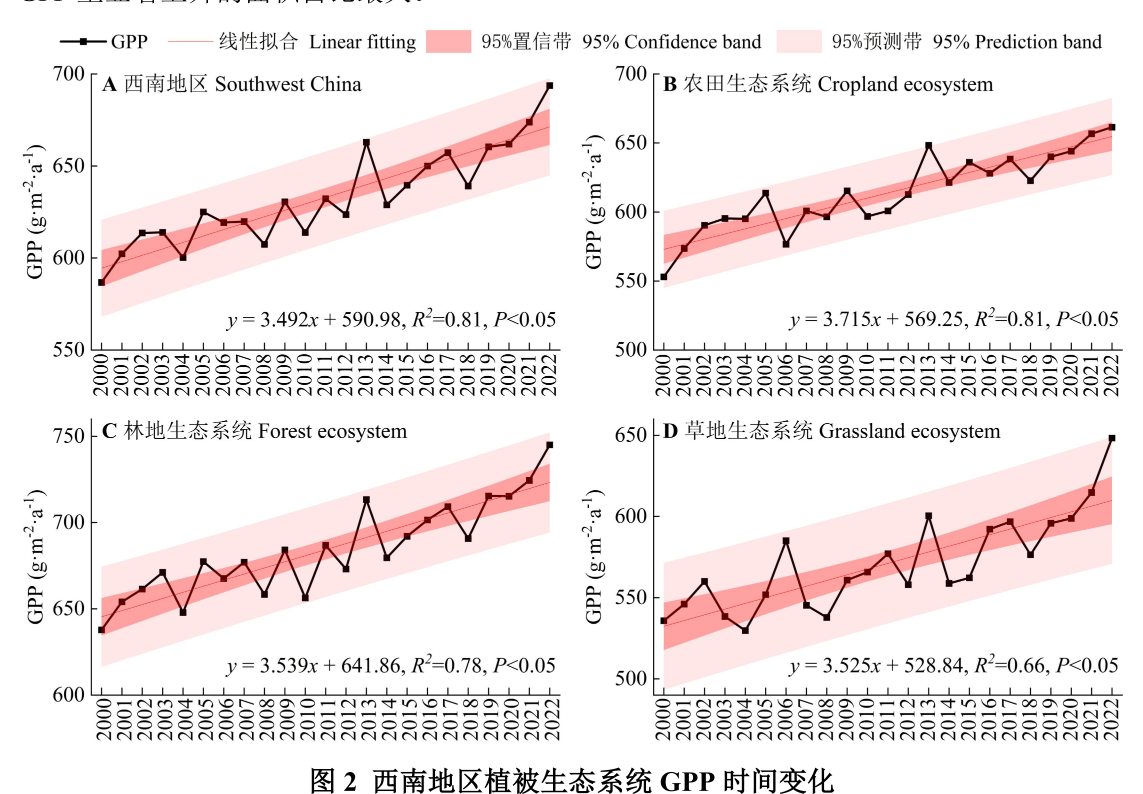



**图 2 西南地区植被生态系统 GPP 时间变化**

Fig. 2 Temporal variation of vegetation ecosystem GPP in Southwest China

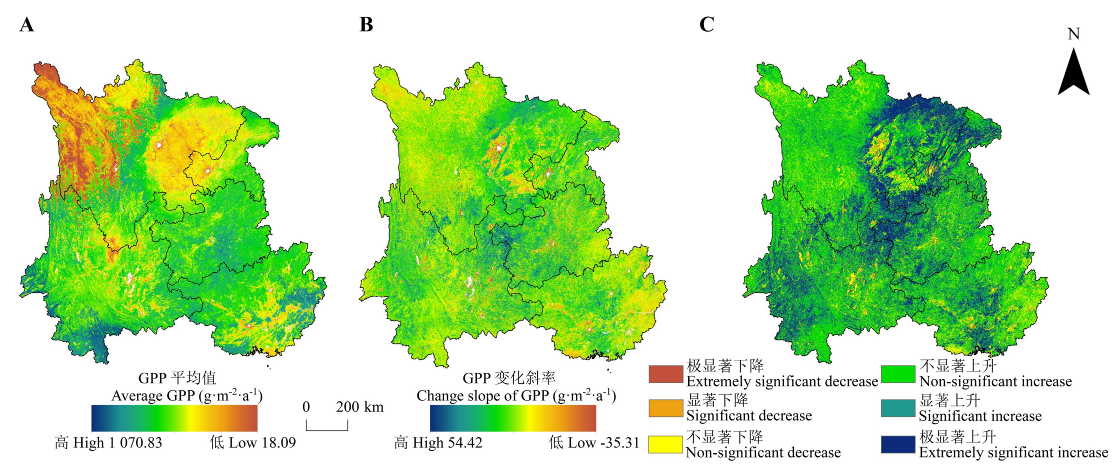



**图 3 西南地区植被生态系统 GPP 空间分布及其变化**

Fig. 3 Spatial distribution and variation of vegetation ecosystem GPP in Southwest China

### 3.2 植被 GPP 与气候因子的多尺度关系

#### 3.2.1 基于区域尺度的植被 GPP 与气候因子的通径分析

由表 1 可知，西南地区植被 GPP 受气温直接、间接和综合影响均为正向作用，分别为 0.688（$P<0.05$），0.005（$P\geqslant0.05$）和 0.693（$P<0.05$）；受降水直接、间接和综合影响均为负向作用，分别为－0.028（$P\geqslant0.05$）、－0.127（$P\geqslant0.05$）和－0.155（$P\geqslant0.05$）。整体上看，气温对各植被生态系统 GPP 的直接、间接和综合影响明显高于降水。从不同的植被生态系统上看，气温和降水对草地生态系统 GPP 变化的综合影响最大，对农田生态系统 GPP 变化的综合影响最小。除对农田生态系统间接作用外，气温对农田、林地和草地生态系统 GPP 变化均具有正向影响，但降水对不同植被生态系统 GPP 变化存在差异。具体表现为，降水对农田生态系统 GPP 变化具有正向影响（直接、间接和综合），对林地和草地生态系统 GPP 变化具有负向影响。

**表 1 气候因子对西南地区植被生态系统 GPP 的影响**

Table 1 Impact of climate factors on vegetation ecosystem GPP in Southwest China

| 类别 Types | 气候因子 Climate factor | 直接影响 Direct impact | 间接影响 Indirect impact | 综合影响 Comprehensive impact |
|---|---|---|---|---|
| 西南地区 Southwest China | 气温 Temperature | 0.688* | 0.005 | 0.693* |
| | 降水 Precipitation | －0.028 | －0.127 | －0.155 |
| 农田生态系统 Cropland ecosystem | 气温 Temperature | 0.513 | －0.025 | 0.488 |
| | 降水 Precipitation | 0.213 | 0.060 | 0.153 |
| 林地生态系统 Forestland ecosystem | 气温 Temperature | 0.629* | 0.014 | 0.643* |
| | 降水 Precipitation | －0.069 | －0.131 | －0.200 |
| 草地生态系统 Grassland ecosystem | 气温 Temperature | 0.677* | 0.038 | 0.715* |
| | 降水 Precipitation | －0.183 | －0.141 | －0.324 |

注：*表示相关系数通过显著性检验($P<0.05$)。

Note：* indicates that the correlation coefficient has passed the significance test ( $P<0.05$).

#### 3.2.2 基于像元尺度的植被 GPP 与气候因子的通径分析

由图 4：a-c 可知，气温对植被 GPP 的直接影响和综合影响高值区主要由西南地区中部向四周蔓延，而间接影响的高值区主要分布由西南地区中部向西部和西南部延伸。气温对植被 GPP 的直接、间接和综合影响呈正向影响的面积占比分别为 69.30%、50.64%和 70.95%。从不同的植被生态系统上看，气温对草地生态系统 GPP 的直接影响和综合影响呈正向影响的面积占比均大于呈负向影响的面积占比，并且草地生态系统 成正向影响的面积占比高于

林地和农田生态系统。由图 4：d-f 可知，降水对植被 GPP 的直接、间接和综合影响呈负向影响的面积占比分别为 56.49%、55.60%和 59.01%。降水对植被 GPP 直接和综合影响呈显著负向影响的区域主要分布在西南地区西部，呈显著正向影响的区域主要分布在四川盆地及其周边地区。从不同的植被生态系统上看，降水对农田生态系统 GPP 直接影响（58.47%）和综合影响（56.32%）以正向影响为主，对林地和草地生态系统 GPP 的直接、间接和综合影响均已负向影响为主，区域占比均大于 50%。

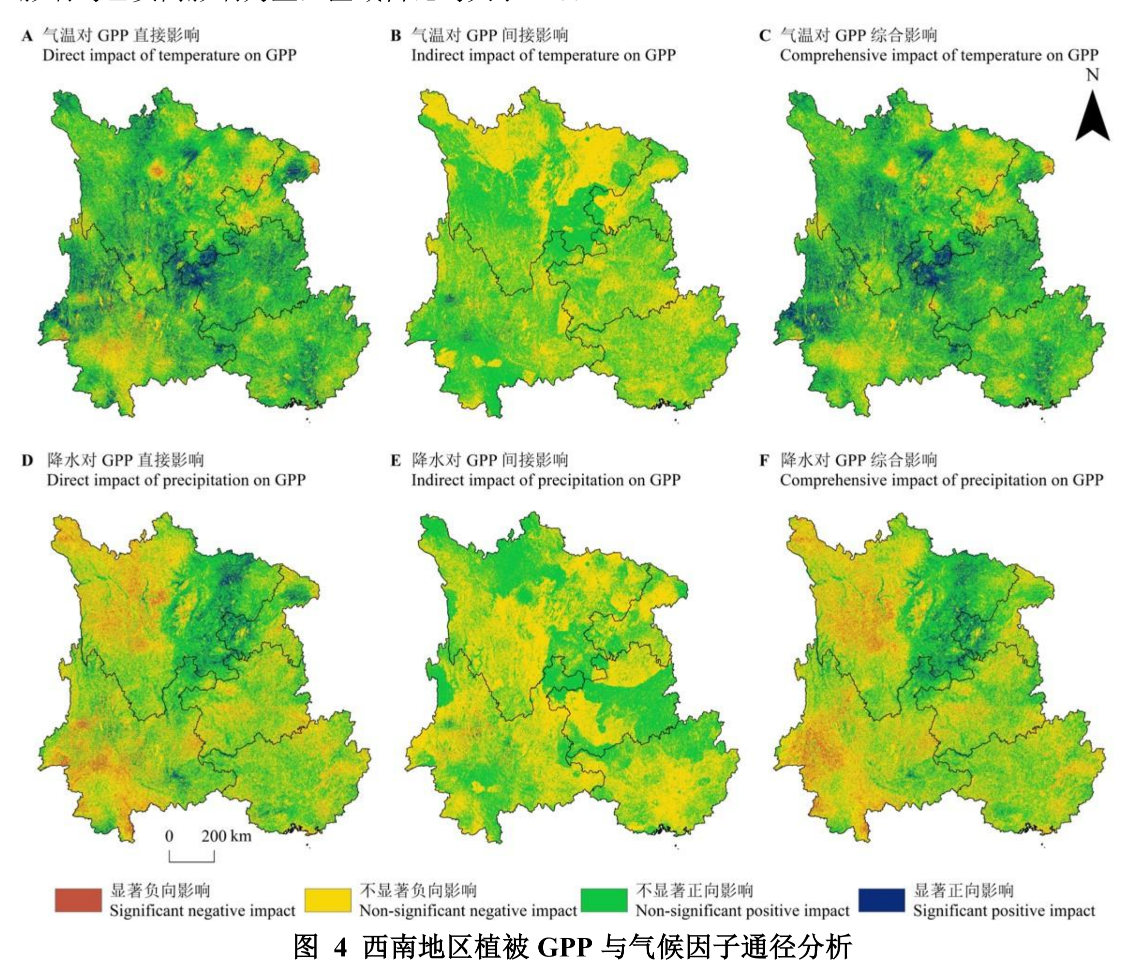



**图 4 西南地区植被 GPP 与气候因子通径分析**

Fig. 4 Path analysis between vegetation GPP and climate factors in Southwest China

3.2.3 西南地区植被 GPP 变化主导因子识别

由图 5 可知，西南地区植被 GPP 变化受气温主导的面积占比大于降水。植被 GPP 变化受气温直接影响主导的面积占比为 84.38%，广泛分布在西南地区。植被 GPP 变化受降水影响的面积占比为 15.62%，其中，降水直接影响主导 13.65%植被 GPP 变化，集中分布在四川东部和云南西部。从不同的植被生态系统上看，农田、林地和草地生态系统 GPP 变化受气温影响直接主导的面积占比分别为 84.42%、84.63%和 85.31%。综上可知，西南地区和各植被生态系统 GPP 变化主要受气温直接影响的控制。气温和降水的直接影响对各植被生态系统的主导面积均大于其间接影响。

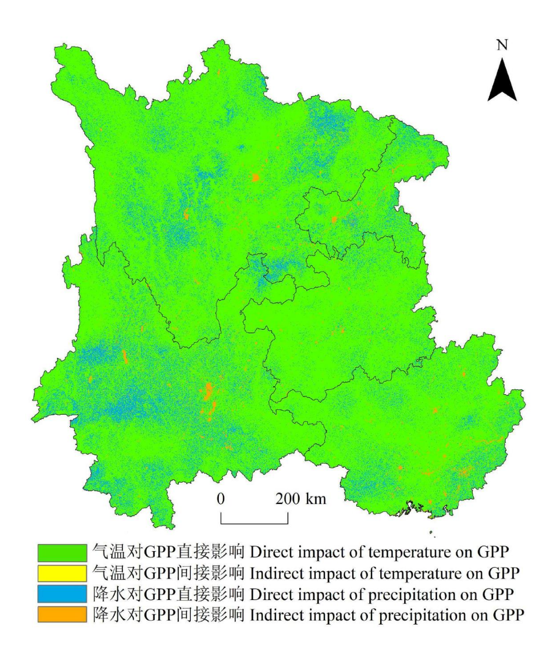



**图 5 西南地区植被 GPP 变化气候主导因子空间分布**

Fig. 5 Spatial distribution of climatical dominant factor on vegetation GPP in Southwest China

# 4 讨论

## 4.1 西南地区植被 GPP 时空变化特征

研究时段内西南地区 86.01%的植被 GPP 整体呈上升态势。西南地区由于其独特的地理环境和地形地貌条件，植被资源丰富，植被类型多样，主要以草原、草甸、灌丛、乔木和栽培植被为主。加之西南地区受亚热带季风气候、高原山地气候和热带季风气候的影响，降水丰沛、热量和光照条件充足，以上条件为植被光合作用和生长发育提供了有利的环境（刘刚等，2017；马炳鑫等，2023）。此外，西南地区实施了退耕还林还草和石漠化综合治理等一系列生态恢复工程，同时，控制放牧数量、禁止滥砍滥伐和开山造田等人类活动负向扰动均对西南地区植被改善具有促进作用（Zeng et al.，2020；Song et al.，2022；耿庆玲等，2022）。因此，西南地区植被 GPP 整体上呈上升趋势，且广泛分布在研究区（Ding et al.，2021；Dong et al.，2023；杜文丽等，2020；徐勇等 2023a）。

西南地区农田生态系统 GPP 上升速率高于林地和草地生态系统，这主要是由于西南地区除实施的一系列生态修复工程以外，人类活动的正向干预，例如 1999 年颁布的《中华人民共和国土地管理法》中明确规定的永久基本农田划定制度，《基本农田保护条例》和《永久基本农田保护红线》的提出，都为农田生态系统生产力和粮食安全的提升提供了保障（王江等，2023）。此外，随着农业技术的发展，智慧农业和数字农业的全面推广，集约化农业得到广泛实施，水利设施的修建和科学田间管理技术的提升，使得西南地区农田生态系统 GPP 的上升斜率高于林地和草地生态系统（马炳鑫等，2023；吴富有等，2023）。

## 4.2 西南地区植被 GPP 与气候因子间的关系

整体而言，气温的西南地区植被 GPP 变化主导气候因子。西南地区位于我国西南部，气候类型多样，气温和降水呈明显的季节变化特征。气温是决定光合作用速率和呼吸作用强度的关键因素，西南地区年平均气温在 15.21~16.26℃之间，在研究时段内气温以 0.21 $℃\cdot a^{-1}$ 的速率上升，在适宜的气温条件下，呼吸作用与光合作用之间的平衡可以保持植被 GPP 的稳定增长。此外已有研究表明，气温升高可以有效延长植物生长季（李婷婷等，2022）。西南地区年累积降水量在 970.12~1 270.16 mm 之间，并且除云南以外，其余地区降水呈上升趋势，加之西南地区河网密布，水系发达，水量丰富，形成了复杂而丰富的长江、珠江、怒

江和澜沧江等水系网络（窦明等，2023；薛媛等，2024），因而降低了植被 GPP 对降水变化响应的敏感性，气温是影响西南地区植被 GPP 变化的主导因素（Gong et al.，2023；Zhang et al.，2023；Li et al.，2024）。

相较于农田和林地生态系统，草地生态系统 GPP 变化受气温和降水的影响更大（表 1）。这是由于草地主要分布在西南地区西北部的横断山地和若尔盖高原地区，该地区地势较高，气温相对较低，年降水量相对较少。相比于林地和农田，草地的植被覆盖度通常较低，根系较浅，生态系统结构较为单一，对于地表温度和土壤湿度等环境因子的变化的缓冲和适应性更弱，而气温和降水对于地表温度和土壤湿度的影响相对于林地和草地更为直接，林地相对于草地具有更好的气温调节和蒸腾截留的作用，而农田受人为管理的影响较大（雷茜等 2024；徐勇等 2024）。因此，草地生态系统 GPP 变化对气温和降水响应更为敏感。

降水对农田生态系统 GPP 变化具有正向影响（直接、间接和综合），主要分布在四川盆地及其周边地区。西南地区农田生态系统多为水田和旱地，且主要分布在四川盆地。以水田为例，种植的作物主要为水稻－其他作物轮作（申哲等，2023），得益于科学的田间管理和灌溉等措施，加之西南地区农业作物基本为需水型农业，降水是对农田生态系统作物生长的一个重要水源补充方式（郭耀辉等，2024）。因此，降水对农田生态系统的直接、间接和综合影响均以正向影响为主。

## 5　结论

（1）在研究的时间段内，西南地区的农田、林地以及草地生态系统 GPP 均呈现出了明显的增长趋势。其中，农田生态系统 GPP 增长速度略高于林地和草地生态系统。

（2）气温对西南地区植被 GPP 的直接、间接和综合影响均以正向影响为主，而降水则均以负向影响为主。值得关注的是，在直接影响和综合影响方面，降水对农田生态系统 GPP 以正向影响为主。

（3）气温对西南地区和各生态系统 GPP 变化的主导面积大于降水。气温和降水的直接影响对各植被生态系统的主导面积均大于其间接影响。

## 参考文献


ARROGANTE-FUNES P, OSUNA D, ARROGANTE-FUNES F, et al, 2024. Uncovering NDVI time trends in Spanish high mountain biosphere reserves: A detailed study [J]. Journal of Environmental Management, 355: 120527.

CAMPS-VALLS G, CAMPOS-TABERNER M, MORENO-MARTÍNEZ Á, et al, 2021. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere [J]. Science Advances, 7(9): eabc7447.

CUI LF, WANG LC, QU S, et al, 2020. Effects of temperature, precipitation and human activities on NDVI of vegetation in the Yangtze River Basin [J]. Earth Science, 45(6): 1905-1917. [崔利芳，王伦澈，屈赛，等，2020. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响 [J]. 地球科学，45(6)：1905-1917.]

DAI LC, GUO XW, ZHANG FW, et al, 2019. Analysis on the relationship between net primary productivity and climate factors and turnover value of two planting types in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 39(14): 5241-5251. [戴黎聪，郭小伟，张法伟，等，2019. 青藏高原两种植被类型净初级生产力与气候因素的关系及周转值分析 [J]. 生态学报，39(14)：5241-5251.]

DANG C, SHAO Z, HUANG X, et al, 2023. Climate warming-induced phenology changes dominate vegetation productivity in Northern Hemisphere ecosystems [J]. Ecological Indicators, 151: 110326.

DING Z, ZHENG H, LI H, et al, 2021. Afforestation-driven increases in terrestrial gross primary productivity are partly offset by urban expansion in Southwest China [J]. Ecological Indicators, 127: 107641.

DONG G, FAN L, FENSHOLT R, et al, 2023. Asymmetric response of primary productivity to precipitation anomalies in Southwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 331: 109350.

DOU M, YU JQ, GUAN J, et al, 2023. Correlation between water system development and connectivity in China based on water resource zoning [J]. Advances in Water Science, 34(6): 877-886. [窦明，余佳琦，关健，等，2023. 基于水资源分区的中国水系发育度与连通度相关性 [J]. 水科学进展，34(6)：877-886.]

FAN F, XIAO C, FENG Z, et al, 2023. Impact of human and climate factors on vegetation changes in mainland southeast asia and yunnan province of China [J]. Journal of Cleaner Production, 415: 137690.

FENG K, WANG T, LIU S, et al, 2021. Path analysis model to identify and analyse the causes of aeolian desertification in Mu Us Sandy Land, China [J]. Ecological Indicators, 124: 107386.

GAO W, ZHENG C, LIU X, et al, 2022. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China [J]. Ecological Indicators, 137: 108745.

GAO ZX, YE J, DING RH, et al, 2022. Response of total vegetation primary productivity to climate change in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 29(4): 394-399+414. [高振翔，叶剑，丁仁惠，等，2022. 中国植被总初级生产力对气候变化的响应 [J]. 水土保持研究，29(4)；394-399+414.]

GENG QL, CHEN XQ, HE XH, et al, 2022. Response of normalized vegetation index of different vegetation types to climate change and human activities in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 42(9): 3557-3568. [耿庆玲，陈晓青，赫晓慧，等，2022. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应 [J]. 生态学报，42(9)：3557-3568.]

GONG H, CHENG Q, JIN H, et al, 2023. Effects of temporal, spatial, and elevational variation in bioclimatic indices on the NDVI of different vegetation types in Southwest China [J]. Ecological Indicators, 154: 110499.

GUO YH, KUANG JX, DU XD, et al, 2024. Research on potential, influencing factors and strategies of grain increase in Southwest China [J]. Resources Development & Market, 40(6): 843-850. [郭耀辉，况嘉欣，杜兴端，等，2024. 中国西南地区粮食增产潜力、影响因素与策略研究 [J]. 资源开发与市场，40(6)：843-850.]

HIGGINS S I, CONRADI T, MUHOKO E, 2023. Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends [J]. Nature Geoscience, 16(2): 147-153.

JI Y, ZENG S, LIU X, et al, 2024. Mutual inhibition effects of elevated $CO_2$ and climate change on global forest GPP [J]. Environmental Research, 252: 119145.

KNAUER J, CUNTZ M, SMITH B, et al, 2023. Higher global gross primary productivity under future climate with more advanced representations of photosynthesis [J]. Science Advances, 9(46): eadh9444.

LEI X, HU ZW, WANG JZ, et al, 2023. Spatiotemporal variations of NDVI in different ecosystems and their responses to climate factors in China from 1985 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 43(15): 6378-6391. [雷茜，胡忠文，王敬哲，等，2023. 1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应 [J]. 生态学报，43(15)：6378-6391.]

LI TT, GUO ZZ, MA C, 2022. Spatiotemporal changes of piedmont phenology int the transitional zone between the second and third steps, China [J]. Geographical Research, 41(11): 3000-3020. [李婷婷, 郭增长, 马超, 2022. 中国第二、三级阶梯地形过渡带山前植被物候时空变化探析[J]. 地理研究, 41(11): 3000-3020.]

LI SC, CAI YL, 2005. Some scaling issues of geography [J]. Geographical Research, (1): 11-18. [李双成，蔡运龙，2005. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究，(1):11-18.]

LI X, XU J, JIA Y, et al, 2024. Spatio-temporal dynamics of vegetation over cloudy areas in Southwest China retrieved from four NDVI products [J]. Ecological Informatics, 81: 102630.

LIU G, SUN R, XIAO ZQ, et al, 2017. Spatial and temporal changes of net primary productivity of vegetation in China from 2001 to 2014 and their relationship with meteorological factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 37(15): 4936-4945. [刘刚，孙睿，肖志强，等, 2017. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系 [J]. 生态学报，37(15)：4936-4945.]

LUO M, MENG FH, WANG YQ, et al, 2024. Interaction between vegetation GPP and soil water in China under climate change [J]. Acta Geographica Sinica, 79(01): 218-239.[罗敏，孟凡浩，王云倩，等，2024. 气候变化下中国植被 GPP 与土壤水的互馈关系 [J]. 地理学报，79(01)：218-239.]

MA BX, HE CX, JING JL, et al, 2023, Attribution of vegetation dynamics in Southwest China from 1982 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 78(03): 714-728. [马炳鑫, 和彩霞, 靖娟利, 等, 2023. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究[J]. 地理学报, 78(03): 714-728.]

MO JF, ZHOU XY, MO WF, et al, 2024. Analysis of vegetation ecological quality change and its driving forces in Guangxi from 2000 to 2020 [J]. Guihaia, 2024, 44(05): 907-924. [莫建飞, 周希源, 莫伟华, 等, 2024. 2000—2020 年广西植被生态质量变化及驱动力分析[J]. 广西植物, 44(05): 907-924. ]

REN Y, ZHANG F, ZHAO C, et al, 2023. Attribution of climate change and human activities to vegetation NDVI in Jilin Province, China during 1998 – 2020 [J]. Ecological Indicators, 153: 110415.

RITTER F, BERKELHAMMER M, GARCIA C, 2020. Distinct response of gross primary productivity in five terrestrial biomes to precipitation variability [J]. Communications Earth &

Environment, 1(1): 34.
SHEN Z, HAN TF, HUANG J, et al, 2023. Spatial and temporal variation of rice relative yield difference and its response to nitrogen fertilizer in China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 29(05): 789-801. [申哲，韩天富，黄晶，等，2023. 中国水稻相对产量差时空变异及其对氮肥的响应 [J]. 植物营养与肥料学报，29(05)：789-801.]
SONG W, FENG Y, WANG Z, 2022. Ecological restoration programs dominate vegetation greening in China [J]. Science of the Total Environment, 848: 157729.
WANG G, PENG W, ZHANG L, et al, 2023. Quantifying the impacts of natural and human factors on changes in NPP using an optimal parameters-based geographical detector [J]. Ecological Indicators, 155: 111018.
WANG J, TANG YY, 2023. Deficiencies and remedies of the basis farmland production regulations under the goal of food security [J]. China Land Science, 37(02): 43-50.[王江，唐艺芸, 2023. 粮食安全目标下《基本农田保护条例》的缺失与补救[J]. 中国土地科学, 37(02): 43-50.]
WU FF, LI ZH, LIAO FQ, et al, 2023. Study on the change of cultivated land contract scale of large grain growers in typical main rice producing areas of middle and lower Yangtze River in recent 10 years: A case study of northern Jiangxi Province [J]. China Land Science, 37(2): 82-91. [吴富有，李资华，廖富强，等，2023. 近 10 年长江中下游典型水稻主产区种粮大户的耕地承包规模变化研究——以江西省北部为例 [J]. 中国土地科学，37(2)：82-91.]
XU C, MCDOWELL NG, FISHER RA, et al, 2019. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change [J]. Nature Climate Change, 9(12): 948-953.
XU Y, LU YG, ZOU B, et al, 2024. Unraveling the enigma of NPP variation in Chinese vegetation ecosystems: The interplay of climate change and land use change [J]. Science of the Total Environment, 912: 169023.
XU Y, HUANG HY, DAI QY, et al, 2023b. Spatial and temporal evolution and driving force of NPP in terrestrial vegetation ecosystem in Southwest China [J]. Environmental Science, 44(5): 2704-2714. [徐勇，黄海艳，戴强玉，等，2023. 西南地区陆地植被生态系统 NPP 时空演变及驱动力分析 [J]. 环境科学，44(5)：2704-2714.]
XU Y, PAN YC, ZOU B, et al, 2024. Quantitative assessment of impacts of climate change on vegetation GPPGS in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Science, 45(3): 1615-1628. [徐勇，盘钰春，邹滨，等，2024. 定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPPGS 变化的影响 [J]. 环境科学，45(3)：1615-1628.]
XU Y, ZHAO C, GUO ZD, et al, 2023a. GPP change and synergistic mechanism of impact factors in eight economic zones of China [J]. China Environmental Science, 43(1): 477-487. [徐勇，赵纯，郭振东，等，2023. 中国八大经济区 GPP 变化及影响因子协同机制[J]. 中国环境科学，43(1)：477-487.]
XUE Y, YANG Q, MA ZG, et al, 2024. Variation trend and possible causes of precipitation at different levels in China from 1961 to 2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,

48(2): 619-644. [薛媛，杨庆，马柱国，等，2024. 1961～2020 年中国区域不同等级降水的变化趋势及其可能成因 [J]. 大气科学，48(2)：619-644.]

YANG YM, LAI Q, LIU XY, 2024. Quantitative effects of climate change and human activities on total primary productivity of vegetation in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 48(3): 306-316. [杨宇萌，来全，刘心怡，2024. 气候变化和人类活动对内蒙古植被总初级生产力的定量影响 [J]. 植物生态学报，48(3)：306-316.]

YUAN M, ZHU Q, ZHANG J, et al, 2020. Global response of terrestrial gross primary productivity to climate extremes [J]. Science of The Total Environment, 750:142337.

ZENG Y, YANG X, FANG N, et al, 2020. Large-scale afforestation significantly increases permanent surface water in China's vegetation restoration regions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 290: 108001.

ZHANG Y, ZHANG L, WANG J, et al, 2023. Quantitative analysis of NDVI driving factors based on the geographical detector model in the Chengdu-Chongqing region, China [J]. Ecological Indicators, 155: 110978.

ZHONG Z, HE B, WANG YP, et al, 2023. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity [J]. Science advances, 9(32): eadf3166.

ZHOU AP, XIANG WS, YAO YF, et al, 2014. Analyzing variation characterizes of vegetation primary production (NPP) in Guangxi [J]. Guihaia, 2014, 34(5): 622-628+588. [周爱萍，向悟生，姚月锋，等. 广西植被净初级生产力(NPP)时空演变及主要影响因素分析[J]. 广西植物, 2014, 34(5): 622-628+588. ]